

# 海面水位の変動と地球温暖化論

保谷 忠男

本学 非常勤講師

## はじめに

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) はその報告書で次のように主張する。「産業革命」以来人為的に大気中へ温室効果気体を排出し続けている。その結果、「地球温暖化」が起こり、今世紀末までに全世界平均で20世紀末に比較して1.8℃～4.0℃上昇する。仮に温室効果気体の大気中濃度が現状に停まったとしても0.6℃上昇する。また、海面水位は、18cm～59cm上昇する [Solomon et al. (2007)、政策担当者向け要約—以下IPCC-WG1-AR4と記す]。この海面水位の上昇に伴い、環礁にある島々で海岸侵食が起こり、水没の危機にあるなどと主張されている。

以上のような主張に対して異なる意見も少なからず出されている。1、2例を挙げると、海面水位の上昇は加速ではなく減速している (Houston & Dean, 2011)、ツバルにおける浸水の原因は「地球温暖化」による海面水位の上昇ではない (Eschenbach, 2004) などである。

本小論は、この対立する見解を検討する。I章では海面水位の上昇に関する問題について、II章では海面水位の変動に関連する諸要因について、III章ではツバルで生起している問題について検討する。

## I. 20世紀における海面水位の上昇

### 1. 検潮記録に基づく海面水位の長期変動傾向

アムステルダムでは1700年から検(驗)潮—潮位観測—が開始された。1800年以前で記録が残っているのは、上記アムステルダムを含めて

4箇所である。したがって、本格的に検潮が開始されたのは19世紀からといってよい。機器による観測結果がえられるようになって高々2世紀しか過ぎてないことになる。最近の1000年間における地球の気候変遷で見逃すことができない、現在よりも高温であった中世温暖期(900～1200AD頃)、寒冷であった小氷期(17世紀～19世紀)<sup>1)</sup>をカバーしていないことに留意する必要がある。

検潮記録を解析し、海面水位の変動を明らかにすることが、20世紀の中頃から行われた(表1)。解析結果からは、全球平均海面水位(global mean sea level—以下ではGMSLと略記する)の年上昇率が19世紀～20世紀中頃までの期間では1.2mm/yr前後になることが明らかとなった(表1:1～5)。これらの解析にあたっては、後述する氷河性アイソスタシー調節(glacial isostatic adjustment-GIA)、構造運動などを考慮し、検潮所設置場所の土地の上下変動が少ないと考えられる箇所を選択するなどの工夫をしている。そのため、日本の検潮記録などは解析に使用されていない。また、南半球での観測記録が少なく、ヨーロッパ、北米などのデータが多くなるが、海域毎にサンプル数を揃えるなどの工夫をして解析を行っている。

IPCCを始めとして、20世紀のGMSLの上昇率を1.7～1.8mm/yrと考えている(表1:6, 10, 11, 12, 13)。

海面水位の上昇率の時間的推移は大きく振動している。例えば、期間10年のGMSLの上昇率は図1のようになっている(Holgate, 2007)。したがって、上昇率を考える場合には、時期、期間に注意しなければならない。また、20世紀

表 1 検潮儀および衛星レーダ測高による海面水位上昇率

番号	発表者	発表年	期間	上昇率 (mm/yr)	備 考
1	Gutenberg	1941	1862-1940	1.1	検潮儀。
2	Fairbridge & Krebs	1962	1860-1960	1.2	検潮儀。
3	Mörner	1973	1830-1930	1.1	検潮儀。
4	Gornitz et al.	1982	1880-1980	1.2	検潮儀。
5	Nakiboglu & Lambeck	1991	—	$1.15 \pm 0.38$	検潮儀。調和解析結果。
6	Douglas	1991	1880-1980	$1.7 \pm 0.1$	GIA 補正。10地域27地点。
7	IPCC-WG1-AR3 <sup>#1</sup>	2001	(過去100年)	1 ~ 2	検潮儀。 中央値：1.5mm/yr。
8	Cabanes et al.	2001	1955-1995	$1.6 \pm 0.10$	検潮儀 (GIA補正)。
9	Cazenave & Nerem	2004	1993-2003	$2.8 \pm 0.4$ 3.1	SRA <sup>#2</sup> 。 SRA <sup>#2</sup> (GIA補正)。
10	Holgate & Woodworth	2004	1948-2001	$1.7 \pm 0.2$	検潮儀 (GIA補正)。 177地点。
11	Church & White	2006	20th century	$1.7 \pm 0.3$	GIA 補正。
12	IPCC-WG1- AR4	2007	1961-2003 1993-2003	$1.8 \pm 0.5$ $3.1 \pm 0.7$	1993年以前：検潮儀、以降 SRA <sup>#2</sup> 。GIA 補正。
13	Holgate	2007	1904-2003 1904-1953 1954-2003	$1.74 \pm 0.16$ $2.03 \pm 0.35$ $1.45 \pm 0.34$	検潮儀 (GIA補正)。 9 地点。
14	Wöppelmann et al.	2007	—	$1.31 \pm 0.30$	土地の昇降を GPS 測定で 補正。28地点。
15	Beckley et al.	2007	1993-1999 1993-2007	$2.5 \pm 0.23$ $3.3 \pm 0.10$	SRA <sup>#2</sup> (GIA 補正)。
16	Cazenave & Llovel	2010	1993-2007	$2.85 \pm 0.35$	SRA <sup>#2</sup> (GIA 補正)。
17	Church et al.	2011a	1972-2008	$1.8 \pm 0.2$ $2.1 \pm 0.2$	検潮儀 (GIA 補正)。 検潮儀+SRA <sup>#2</sup> 。GIA補正。
18	Nerem et al.	2012	1993-2009	$3.4 \pm 0.4$	SRA <sup>#2</sup> (GIA 補正)。

#1：Houghton et al.(eds)(2001)。

#2：SRA：衛星レーダ測高(Satellite Radar Altimetry)。

に観測された海面水位の変動は、地表気温偏差の変動と同様に小氷期からの回復過程としての側面を持つことに注意する必要がある。

## 2. 検潮記録と氷河性アイソスタシー調節 (GIA)

検潮記録は、検潮所の土地に対する相対的な海面水位の変動を記録したもので、絶対的な海面水位を記録したものではないという特性を持

つ。また、設置場所－測定箇所が沿岸或いは島などに限定されるため、測定箇所の空間的な分布に偏りが生じているとの指摘もある（例えば、Cazenave & Nerem, 2004）。

真の海面水位の変動を知るには、検潮所の土地の上下動を補正する必要がある。

氷河期に氷床が存在したスカンジナビア半島やカナダ・アメリカ合衆国五大湖周辺などでは、海（湖）岸が隆起する現象が分かっていた。

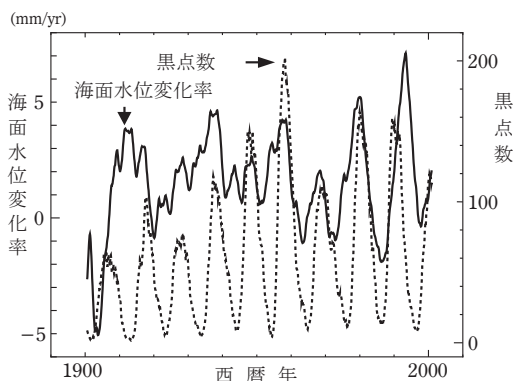


図1 海面水位上昇率の変動と太陽黒点数の変動との関係 (Archbaldによる<sup>2)</sup>)

〔海面水位上昇率：Holgate (2007) にしたがって作成<sup>3)</sup>。〕

この現象は、氷河性アイソスタシー調節 (GIA)、或いは後氷河期リバウンドと云われている<sup>4)</sup>。

前述のように真の海面水位の変動を知るには、検潮記録から検潮所を設置した土地の上下動を除く必要がある。その上下動の顕著なもの1つとしてGIAがあることになる。

GIAを補正した海面水位の変動の把握が試みられた (Douglas, 1991)。その結果によれば、20世紀における年平均上昇率は $1.7 \pm 0.1 \text{ mm/yr}$ となった (表1:6)。以後、このGIAを取り除く操作を含めることが実質的には標準的操作のようになった (表1)。

GIAは全球平均で $-0.3 \text{ mm/yr}$ になるという<sup>5)</sup>。そのために、GIAに対する補正を施すと、GMSL上昇率が $0.3 \text{ mm/yr}$ プラスされることになる。例えば、表1:10の $1.7 \text{ mm/yr}$ はGIAに対する補正を施さない場合には、約 $1.4 \text{ mm/yr}$ 程度になると考えられる。また、表1:8の場合にもGIAに対する補正を実施しないと、約 $1.3 \text{ mm/yr}$ 程度と考えられる。この値は、表1:1~5の場合に近い値となっている。

### 3. GPSによる土地の上下動の把握

1980年代からGPSが測量に利用されるようになった。しかし、鉛直成分の精度の限界から

GPSは主に水平変動への応用に限られていた (Bouin & Wöppelmann, 2010)。現在は鉛直成分について週単位で $\text{mm}$ 単位の精度を達成できるようになったという (Wöppelmann et al., 2007)。

理想的には検潮儀の上下動を直接測定できればよい訳であるが、実際には検潮儀の設置地点に近い場所にGPS受信機のアンテナを設置し、その土地の上下動を測定できるようにしている。2006年時点で全世界に160箇所設置されている (Wöppelmann et al., 2007)。

Wöppelmann et al. (2007) は28箇所GPSおよび検潮儀の結果を解析した。GPSの観測期間は2.7~6.7年、平均5.9年となる。この平均観測期間5.9年の観測結果を解析し、GMSLとして $1.31 \pm 0.30 \text{ mm/yr}$ を得ている。GIA補正を行ったDouglas (2001) の結果では $1.84 \pm 0.35 \text{ mm/yr}$ であった。ただし、設置地点の土地の上下動は観測期間内と同様な変動が20世紀中継続していたと仮定した解析であった。Wöppelmann et al. (2009) では、GPSの解析方式によりULR1 (GMSL:  $1.3 \text{ mm/yr}$ )、ULR2 (GMSL:  $1.4 \text{ mm/yr}$ )、ULR3 (GMSL:  $1.6 \text{ mm/yr}$ ) という解析結果が報告されている。最新の解析方式ULR4ではGMSLが $1.5 \text{ mm/yr}$ と計算できる<sup>6)</sup>。以上の結果は、GPSの最新の解析結果を用いると、20世紀のGMSLの値が通常言われている約 $1.8 \text{ mm/yr}$ より小さい値、約 $1.5 \text{ mm/yr}$ となることを意味している。

GPSによる土地の昇降の測定を行ったWöppelmann et al. (2007) は、これまでの大きな課題であった検潮記録から土地の昇降の影響を取り除く可能性を示した。しかし、以上の経過をみると、まだ、観測継続期間も短く、継続して観測・解析する必要がある。

### 4. GPS観測結果とGIAによる土地の上下動との比較

GPSの解析結果としてULR4を用いた土地の昇降とGIAによる場合を比較した例 (Houston

& Dean, 2012) によると、GIAの値が大きい場合には両者は正の相関を示すが、GIAの値が小さい場合には両者には相関が見られなくなる(図2)。現状ではGIAに改良が必要であることを示すものとなっている。この結果には、土地の昇降にはGIA以外にもあることも関係しているのであろう。

この結果は、GIAに対する補正の適用には注意が必要であることを示している。また、GIAは別の解析にも使用されている(例：GRACE<sup>7)</sup>)。そのために、GIAの実態の正確な把握と、その精緻なモデル化が求められている。

## 5. 衛星レーダ高度計による海面水位の測定

1992年にTOPEX／ポセイドン(TOPEX/Poseidon)<sup>8)</sup>が打ち上げられ、衛星レーダ高度計による測定(satellite radar altimetry-SRA)が始まった。検潮儀の設置が陸に限定されているのに対して、この方式では(軌道による制限があるが)海洋全体を観測できるようになった。そのために、空間的なサンプリング密度が飛躍的に高まった。その一方で、時間的なサンプリング密度が薄くなった。

空間的なサンプリング密度を飛躍的に高めたために、観測結果からは海洋が一様ではなく、局所的に海面高度の変化速度も大きく変化して

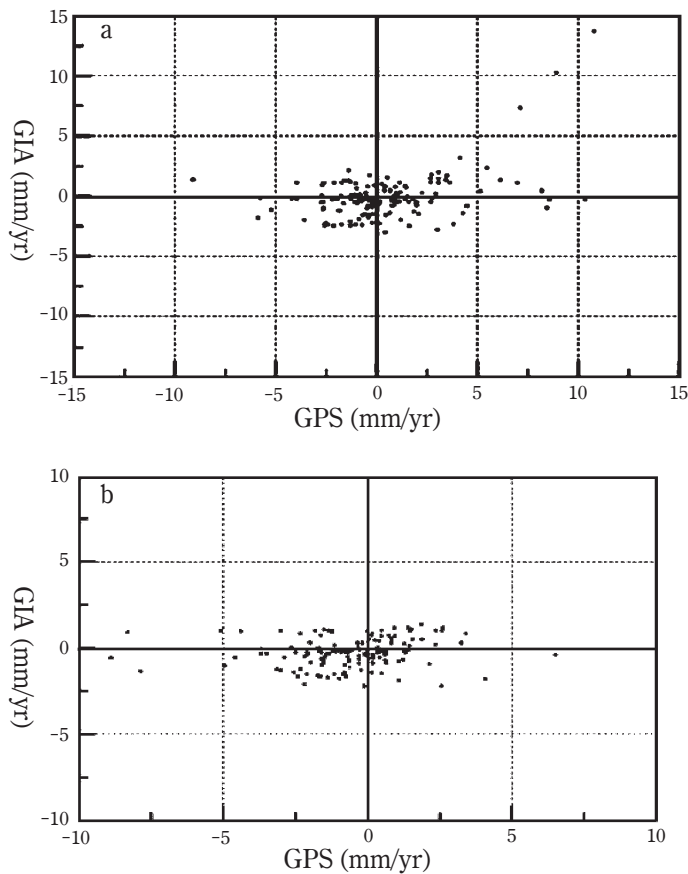


図2 GIAとGPS測定で得た値の比較

a : Bouin & Wöppelmann (2010) Fig.10をHouston & Dean (2012) が書き直したもの。  
b : Houston & Dean (2012) による。

いることが明らかにされたと評価されている。なお、検潮儀の記録でも場所場所でかなり上昇率が異なっている。

ある地点の検潮儀の記録とその近辺におけるSRA値の差 (point-to-point) の標準偏差は2~3 cmであった。また、変化率の誤差は $\pm 0.4$  mm/yrであるという (Cazenave and Nerem, 2004)<sup>9)</sup>。

SRAから求められたGMSLの変化は、1993-2003年の11年間では2.8mm/yr (Cazenave & Nerem, 2004) となった (表1:9)。これにGIAに対する補正を実施すると3.1mm/yrとなる。82地点の検潮儀の記録から求めた、この期間のGMSLの変化は、GPSによって測定した土地の上下動を補正して2.9mm/yrとなった<sup>10)</sup>。検潮記録から求めた海面水位の変化率とSRAで求めた変化率がほとんど等しくなった。10年と期間が短いために、このGMSLの値は長期のトレンドを示すものではない (図1参照)。長期のトレンドに比較して、求めたGMSLが大きな値となったのは、GMSLの変動の現れである。

## 6. 20世紀後半~21世紀初頭における海面水位の上昇は減速している

今世紀末の海面水位に対するIPCCの予測では、CO<sub>2</sub>などの温室効果ガス排出量のシナリオに応じて、前世紀末より18~59cm上昇するとされている (IPCC-WG1-AR4, 政策担当者向け要約)。前世紀末における長期のトレンドは、1.7~1.8mm/yr - GPSによる土地の上下動を補正すると約1.5mm/yr (3. 参照) - とされているので、現在より加速しないと上記予測にならない。多くの論文が加速しているという結論を出している [例えば、Church & White (2006)]。そこで、海面水位の上昇が加速しているかどうか調べてみることにする。

GMSLの期間10年変動率を積分して求めたGMSLの変動は、上に凸の放物線になった (Holgate, 2007)。つまり、GMSLの上昇は減速をしていることになる。同様なことは、北米

57箇所の検潮儀データおよびGMSLの解析結果にもみることができる (Houston & Dean, 2011)。また、20世紀の前半と後半では、上昇率が前半の方が大きい [Holgate (2007)。表1:13参照]。一方、対象期間を長くし、18~20世紀を対象とする場合を考える。その場合には、GMSLが18世紀半頃に極小値をとっているために、2次曲線のあてはめを行うと2乗の項の係数がプラスとなる。つまり、GMSLの上昇が加速していることになる (Church & White, 2006; Church & White, 2011; Jevrejeva et al., 2008など)。

図3:aにみるように、GMSLの推移は確かに

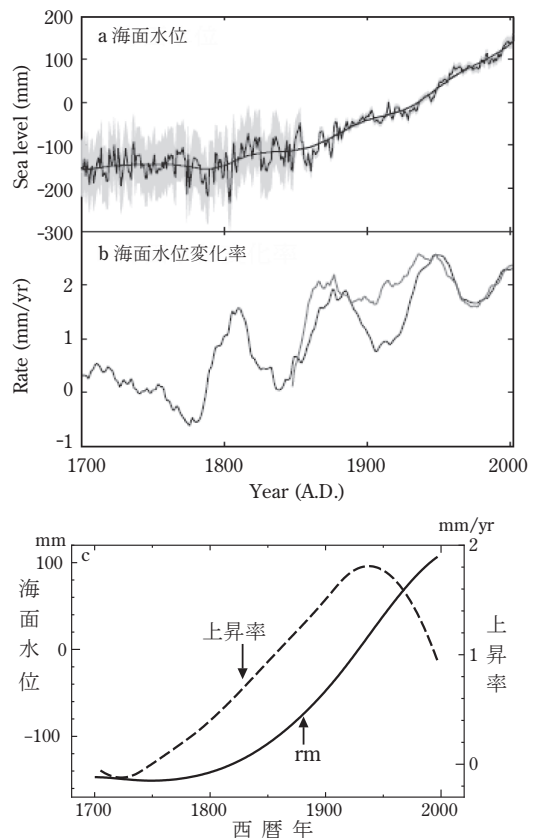


図3 海面水位の変動とその変化率の推移

a, b: Jevrejeva et al. (2008) を一部改変。

bにおける1850年頃からの曲線は北東大西洋での変化率を示す。

c: rm-EMD法によって得た残余(トレンド)。上昇率-トレンドの期間11年の平均上昇率。データはJevrejeva et al. (2008) による。



放物線のあてはめを行うと下に凸となり、GMSLの上昇が加速していることになる。変化率(図3:b)をみると、極大値の包絡線は上に凸の曲線になっている。つまり、変化率でみると海面水位の上昇は最近減速している。このJevrejeva et al. (2008)の解析結果は非常に重要である。海面水位は18世紀後半から上昇を開始した。約60年程度の周期で上昇率を振動させながら、傾向としては上昇率を増大させていった。一方、上昇率の振動の振幅は減少させていった。20世紀半頃に極大値の包絡線がピークに達している。それ以降では、読み取れる傾向は上昇率ピーク値の減少と振幅の減少である。両者がどの程度減少するかは不明である。

Jevrejeva et al. (2008)のデータ<sup>11)</sup>を使い、Empirical Mode Decomposition (EMD) 法<sup>12)</sup>を適用してトレンドを求めると図3:cのようになる。トレンドが1940年付近で変曲していることが分かる。そのことをより鮮明に示すために、そのトレンドについて期間11年の平均上昇率の推移をみると、トレンドの平均上昇率が1940年頃にピークとなり、以降では下降している。即ち、海面水位の変動のトレンドが減速していることを確認できる。なお、ここでは平均上昇率の相対的な増減を問題にし、その絶対値は問題にしていない。このようにトレンドがなる原因は明らかになっていない。したがって、

トレンドが今後どのように変動するかは不明である。また、準周期10年以上のIMF(補注12参照)の和は2000年頃にピークになっている。そのことはここしばらくは減速期である可能性が大であることを示している。

図4にみるように、GPSで検出された検潮儀設置地点の土地の上下動を補正した検潮儀データによる期間18年のGMSL上昇率の推移も1990年代終りにピークとなり減少し始めている。つまり、減速している。図から判断すると、この減速は約10年程度継続する可能性が高い。

SRAによるデータと検潮儀によるデータを接続してGMSLの上昇が加速しているという見解もみられる(Church & White, 2006)。SRAデータが1993~2011年まで19年間使用可能であることを考慮して、SRAから得たGMSLについて期間10年の上昇率の推移<sup>13)</sup>を調べると、図5のようになり、2001年頃にピークとなっている。このことは、SRAのデータでも現在は海面水位の上昇が減速していることを明瞭に示している。期間10年上昇率であるのでエルニーニョ・南方振動の影響はほとんど消去されているが、残っている可能性はある。期間10年上昇率の解析結果(Holgate, 2007)では10年から16~17年程度の準周期変動が見られるので(図1参照)、そのような準周期変動の現れである可

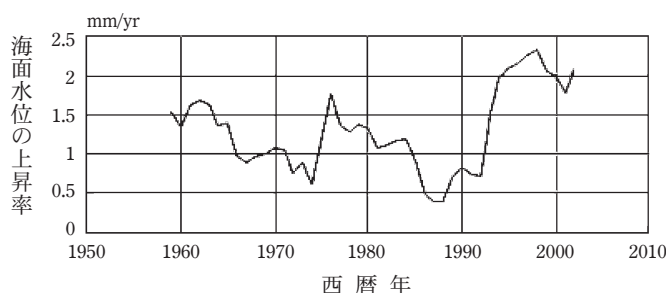


図4 海面水位における期間18年の上昇率の推移  
(補注10に記述したデータを使用して作成。)

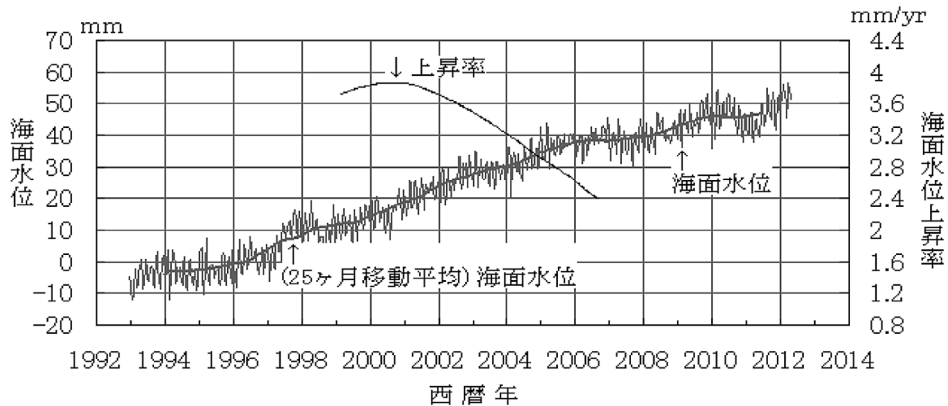


図5 SRAによる海面水位および期間10年上昇率の推移

(データ：コロラド大 version\_2012\_rel4。)

能性が強い。図4の変動もそのような準周期変動の影響を受けている可能性が強い。図3:cに照らしても上昇率の変化がどのような推移をたどるかを注意深く監視することが必要である。

以上の解析結果は、GMSLのトレンドの単純な外挿で将来を推計することはできないことを示す。一方で、IPCCの予測－18～59cm－を満たすためには、上昇率が加速しなければならない。しかし、図3:cで見たように、そのようにはならず、上昇率が減速しているのが現状である。

## II. 海面水位変動の諸要因および海面水位の将来予測

海面水位を変動させる主要な要因として、①海水温による海水の熱膨張、②海水量の変化1－氷床・氷帽・氷河の消長、③海水量の変化2－地表水・地下水量の変化などがある。また、①および②の重要な原因の1つとなる太陽活動の影響を直接GMSLの上昇率の変動にみることができる。簡単にこれらについて概観するとともに、海面水位の将来予測の問題点をみることにする。

### 1. 太陽活動の影響

太陽から地球に入射するエネルギーが地球の気象・気候を変動させる最大のエネルギーであることはいうまでもない。その意味では海面水位の変動も太陽からのエネルギー量と大いに関係していることは間違いのないことである。しかし、それはいろいろな経路をたどり影響している。そのために、太陽活動と海面水位の変動との間に関係を見出すことには優れた洞察力を必要とする。Fairbridge & Krebs (1962) はGMSLの変動と太陽黒点数の変動とに関係があることを指摘した。しかし、その関係はあまり明瞭ではなかった。Archibald (補注2参照) は太陽黒点数の変動とHolgate (2007) によるGMSLの期間10年上昇率の変動との間に関係があることを明らかにした(図1参照)。定量的な関係ではないが、両者の周期と位相がほぼ等しいことを読み取ることができる。太陽黒点数は太陽の活動度の指標の1つである。その数が増えると、太陽活動が活発になる。したがって、この図は太陽活動がGMSLの変動に影響していることを直接的に示している。太陽活動のGMSLに対する影響を定量的に明らかにすることは今後の課題である。

## 2. 海洋の温度による海水の熱膨張の影響

最新データによる海水熱膨張の影響は図6のように変化している(Levitus et al., 2012)。また、同じことであるが、海洋の熱保有量の推移も図7のようになる(Levitus et al., 2012)。図7には参考のために地表気温偏差全球平均値の変動も記入した。

2003年以降はアルゴ(Argo)フロートの観測結果が全面的に活用されるようになった<sup>15)</sup>。そのために、データ密度の著しい改善をみた。

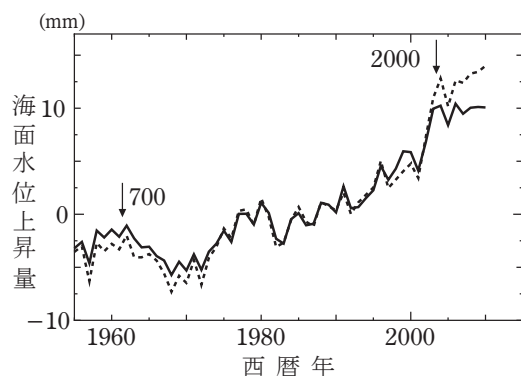


図6 熱膨張による海面水位の上昇

[Levitus et al. (2012) による]

(700 : 0-700mm 層の熱膨張分、2000 : 0-2000層の熱膨張分。)

0-700m層では、海面水位に対する熱膨張の影響は、1955~2003年では0.41mm/yrであったが、2003~2008年では0.23mm/yrと減少している。それにも拘らず、0-2000m層全体として熱膨張の影響が1955~2003年の0.54mm/yrから2005~2011年の0.72mm/yrと増加しているのが特徴となっている(Levitus et al., 2012)<sup>16)</sup>。Cabanes et al. (2001)を除くと、海面水位上昇率に占める熱膨張の影響は、20世紀後半~20世紀終り頃まででは2~6割程度に分布し、平均は4割弱となる(表2)。最新のデータであるLevitus et al. (2012)のデータで考えると、GMSLの上昇率に占める熱膨張の影響は2~3割程度となる(表2)。Levitus et al. (2012)の特徴は2003年以降で上昇率が停滞していることである。

海洋の熱保有量に目を向けると、0-700m層において2003年以降の熱保有量の増加が停滞していることが顕著な特徴となっている。同様なことが地表気温偏差全球平均値の推移にも現れている(図7参照)。図7では両者の類似性が注目される。地表気温偏差全球平均値と0-700m層の熱保有量との相関係数は0.84<sup>17)</sup>となり、両者の時間的推移の類似性を裏付けている。

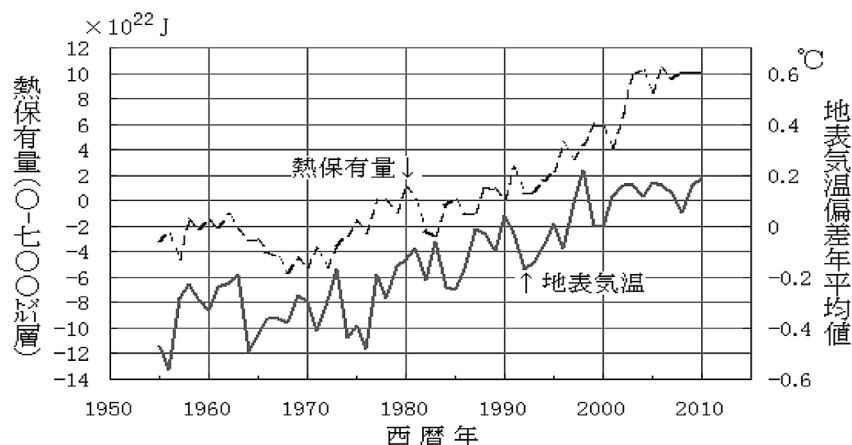


図7 海洋の(0-700m層)熱保有量と地表気温偏差年平均値の推移

(熱保有量 : Levitus et al. (2012) から作成。地表気温偏差年平均値 : 気象庁資料<sup>14)</sup>。)



表2 熱膨張による海面水位の変動

調査者	発表年	熱膨張による海面水位上昇率 (mm/yr)	対象期間	海面水位上昇率 (mm/yr)
IPCC-WG1-AR4	2007	$0.42 \pm 0.12$	20世紀半～	$1.8 \pm 0.5^{#1}$
		$1.6 \pm 0.5$	1993～2003	$3.1 \pm 0.7^{#2}$
Cabanes et al.	2001	$1.4 \pm 0.10$	1955～1996	$1.6 \pm 0.15^{#1}$
		$3.1 \pm 0.4$	1993～1998	$3.2 \pm 0.2^{#2}$
Antonov et al.	2002	$0.55 \pm 0.07$	1957～1994	$1.6^{#3}$
Wills et al.	2004	$1.6 \pm 0.3$	1993～2003	$2.8^{#4}$
Church et al.	2011a	$0.80 \pm 0.15$	1972～2008	$1.83 \pm 0.18^{#1}$ $2.10 \pm 0.16^{#2}$
		$0.88 \pm 0.33$	1993～2008	$2.61 \pm 0.55^{#1}$ $3.22 \pm 0.41^{#2}$
Levitus et al.	2012	$0.54 \pm 0.05^{#5}$	1955～2010	$1.9^{#6}$
		$0.68^{#7}$	2003～	$3.5^{#8}$

#1：検潮儀による値。

#2：SRAによる値。

#3：Church & White (2011) から作成。期間1957-1994。検潮儀による値。

#4：Cazenave & Nerem (2004) による。SRAによる値。期間1993～2003。

#5：2000m以深を考慮しない0-2000mの値。

#6：Church & White (2011) から作成。期間1955～2009。検潮儀およびSRAによる値。

#7：2000m以深を考慮しない0-2000mの値。Levitus et al. (2012) より作成。

#8：Church & White (2011) から作成。期間2003-2009。検潮儀およびSRAによる値。

IPCC-WG1-AR4が公表された際に出された、多くの研究者が署名した国連事務総長宛て公開状では、現在の気温偏差の変動は自然の変動であることが指摘されていた<sup>18)</sup>。大気中CO<sub>2</sub>濃度が増加している条件下での地表気温偏差の停滞は大気中CO<sub>2</sub>濃度が主要な因子であるとする立場に立つ計算機シミュレーションでは説明できないことも指摘されていた。その指摘はそのままこの海洋の熱保有量の停滞にも有効である。

Hansen et al. (2005) による1993-2003年間の海洋熱保有量の推移に関するシミュレーションの結果を直線回帰すると、勾配が $0.70 \times 10^{22}$  J/yrと回帰された<sup>19)</sup>。2003年以降も大気中CO<sub>2</sub>濃度は増加している。一方、2003年以降の熱保有量の観測ではその変化の勾配は $0.051 \times 10^{22}$  J/yrと回帰される。両者のこの差は非常に大きい<sup>20)</sup>。Hansen et al. (2005) の方式ではこの海

洋熱保有量の停滞を説明することができない。この海洋熱保有量の停滞の原因を明らかにすることは今後の課題である。

### 3. 氷床・氷帽・氷河の影響

氷床・氷帽・氷河（以下では一括して「氷河」という場合がある）には多くの淡水がある。それが融解すると、海面水位が上昇する。また、逆に氷河が成長すれば海面水位が低下する。例えば、最終氷期であるウルム氷期の最盛期には海面水位は約120m低下したと云われている。

気温が上昇すると、氷河の融解が進むという具合に簡単にはならない場合がある。一般的には気温が上昇すると大気に含まれる水蒸気量が増加しうるので、降水量が増加する可能性がある。その場合には氷河涵養域では降水（雪）量

が増加する。一方、氷河の消耗は、気温が実際に融解の進む温度帯になるかどうかが問題となる。個々の氷河の地理的・気象的・気候的な条件が絡んで、実際の氷河の質量収支が定まってくることになる。そのために、氷河の質量収支を明らかにすることは難しい課題となる。現状は基礎的な氷河の目録 (glacier inventories) が不足していると慨嘆される状況である (Pfeffer, 2011)。

GMSL に対するグリーンランドの氷河の影響を調べた結果では、GMSL の変動への影響が 0.12~1.3mm/yr の範囲で報告されている<sup>21)</sup>。この例に見られるように、いろいろな方法で得られた氷河のGMSLへの影響には大きな開きがある。質量収支モデル法について述べた次のような述懐は他の方法についても多かれ少なかれ同種のことが云えるのであろう。積雪と融解の変動を推定するために、氷河の質量収支モデルで使用するパラメータリゼーションの妥当性を確信的には明らかにしていない。例えば、グリーンランドについて、現在、氷床が均衡からそんなに外れていないことは誰しも認めるが、氷床が成長しているのか後退しているのかよく分らない (van der Veen, 2002)。

前述の Pfeffer (2011) の慨嘆からも分かるように、基礎的な氷河目録の作成・整備が課題となる。

ここでは、気温の変動、氷の融解状況などを見てみることにする。

#### a) グリーンランド

グリーンランド氷床の融解が大きく報じられた (例えば、朝日新聞2012年9月17日)。その記事では標高1500mの氷床表面が融解している状況が報じられた。また、先住民イヌイットとして暮らす日本人を取り上げ、海水が10年前に比較して少なくなったことを報じている (朝日新聞、2006年5月29日)<sup>22)</sup>。このように、グリーンランドの氷の融解がいわゆる「地球温暖化」と結び付けてセンセーショナルに報じら

れている。

グリーンランドの氷河について、その融解範囲の推移を調べた結果は図8-パネルAのようになっている (Frauenfeld et al., 2011)。また、パネルBには氷床上の気温偏差、パネルCには北大西洋の海面温度を示した。パネルAは、氷床の融解範囲を指数化して (氷融解範囲指数 - ice melt extent index)<sup>23)</sup>、その指数の推移を示したものである。Frauenfeld et al. (2011) は、気温と北大西洋振動 (North Atlantic Oscillation-NAO) をパラメータとして、氷融解範囲指数を再現した。その再現結果 (図8:A) によると、現在と並んで1920年代半から1960年代に続く期間にも融解が進んだ時期があったことが分かる。しかも継続期間が約40年程度と長い。この期間は気温偏差がプラスの期間でもあった (図8:B,C)。この1920年代半~1960年代の期間は、興味深いことにJevrejeva et al. (2008) による解析 (図3参照) における相対的に海面水位の上昇率の高い時期に対応している。図3によると、現在の海面水位の上昇率が1950~1960年代の時期より小さいことにも留意する必要がある。また、20世紀にグリーンランドの南部と西部の氷河は後退した。しかも、20世紀の後半に比較して前半の方が後退量が大きかったと報告されている (Leclercq et al., 2012)<sup>24)</sup>。

20世紀の前半 (あるいは1920年代半~1960年代の期間) は、現在と比較すると大気中温室効果ガスの濃度は低かった。それにも拘らず上記の結果となっている。これらの例は、現在進行中のグリーンランド氷床の融解も自然の変動である可能性が非常に大であることを示している。

前記本年 (2012年) の大規模な氷床の融解についても、その前には低温期にも拘らず1889年に起きている (Alley & Anandakrishnan, 1995)。自然の変動の大きさを示す1例といえる。このような大規模な融解の生起をさらに遡ると、中世温暖期にも起きていることがアイスコアの解

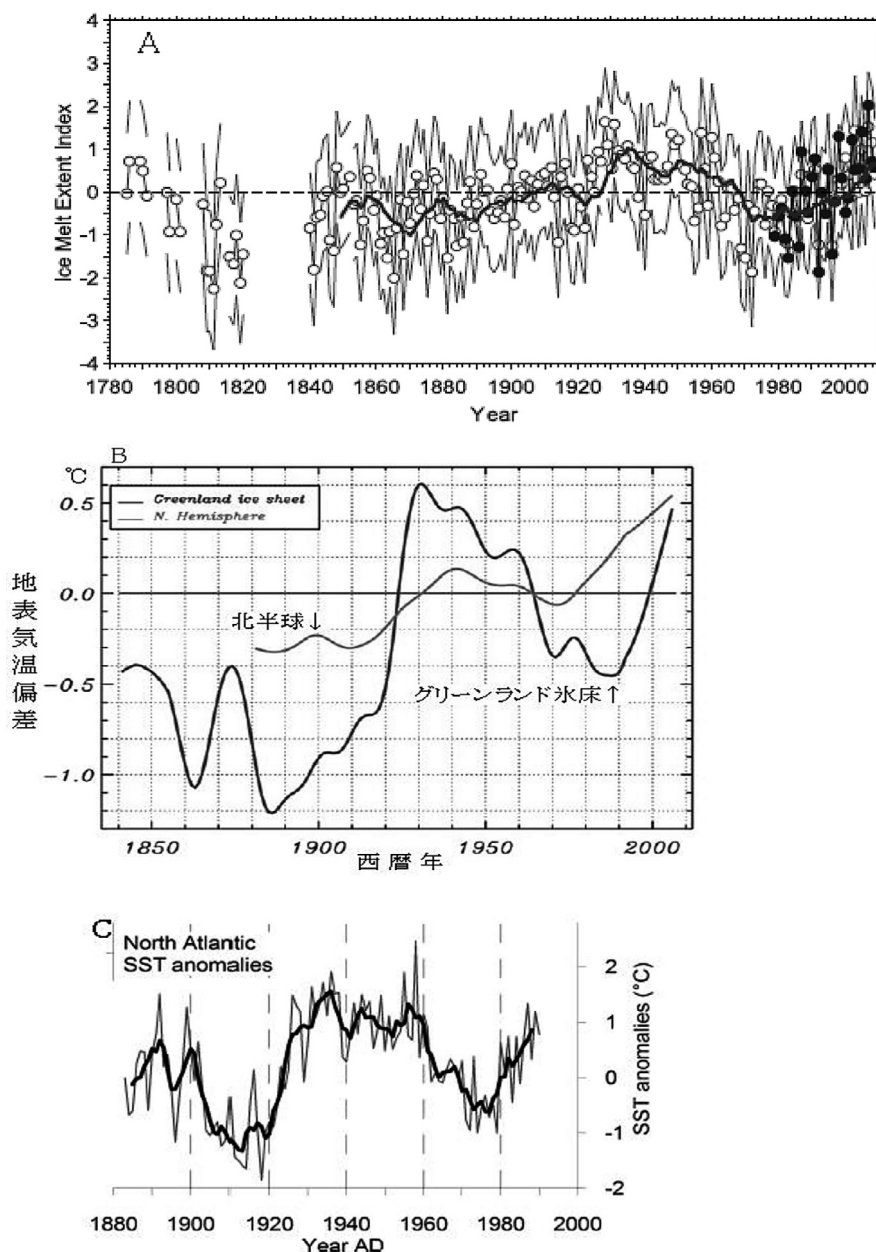


図8 グリーンランドの氷融解範囲指数の推移および気温偏差の推移

- A: 氷融解範囲指数の推移。黒丸－観測値。白丸－再現値。黒実線：10年移動平均曲線。灰色線：95%信頼限界。Frauenfeld et al. (2011) による。
- B: 氷床上の気温偏差。ローパスフィルター使用。基準年：1951-1980。Box et al. (2009) を一部改変。
- C: 北大西洋 海面温度偏差。Opel et al. (2009) による。

析から分かっている (Alley & Anandakrishnan, 1995)。以上のことから、今回のような融解も自然の変動の現れと考えることができる。

b) 南極  
南極の広大な氷床は標高の高いところが多い。そこは低温であるので、多少の気温上昇で

は氷床の氷が融けるようにはならないところが多く分布する。そのような地域では降雨(雪)量が増えれば、氷床・氷河が成長することになる。

南極の氷床は大きくは、東南極氷床 (East Antarctic Ice Sheet-EAIS) と西南極氷床 (West Antarctic Ice Sheet-WAIS) に2分される。その内、EAISは標高も高く、融解量も少ない。一方、WAISではEAISに比較すると融解量が多い。特に南極半島ではエルニーニョ・南方振動 (El Niño-Southern Oscillation - ENSO) などの影響を受け、地表気温も上昇している。そのために、南極半島は南極では相対的に融解量が多い場所となっている。

南極の地表気温の変動は図9:aのように推移している。図9:aには1970年以降のトレンドが示されている<sup>25)</sup>。この図9:aは、1970年以降には南極全体のトレンドとして上昇傾向も下降傾向も無いことを示している。この結果は、O'Donell et al. (2011) による解析の結果と同様である。その解析結果では、1957-2006年間では、気温の変動率は南極地域全体、東南極地域、西南極地域および南極半島でそれぞれ0.05℃/10年、0.02℃/10年、0.08℃/10年、0.34℃/10年となっている。即ち、南極半島だけに大きな昇温があった。このことはMonaghan & Bromwich (2008) の結果とも合致する。しかし、その南極半島において、2000-2011年の傾向では-0.57℃/10

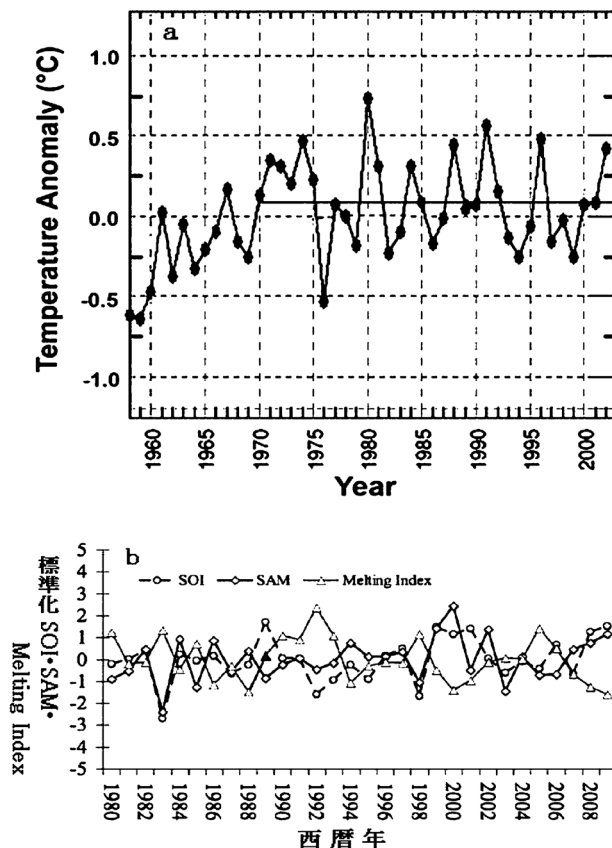


図9 南極の年平均気温偏差などの推移

a : Chapman & Walsh (2007) による。 b : Tedesco & Monaghan (2009) を一部改変。  
SOI : 標準化南方振動指数、SAM : 標準化南半球環状モード、Melting Index : 標準化融解指数。

年と下降を示している (McGrath & Steffen, 2012)<sup>26)</sup>。このことは融解指数の顕著な低下にも現れている (図9:b)。図9:bでは南方振動指数 (Southern Oscillation Index - SOI) と南半球環状モード (Southern Annular Mode - SAM) の両者がプラスの場合には、融解指数がマイナスになっている (例: 2000年頃)。逆に、両者がマイナスの場合には融解指数がプラスになっている (例: 1983年)。これはENSOなどの影響を強く受けていることを示している。南極半島の占める割合は南極大陸全体の約4%とわずかであるが、融解指数の変動には南極半島の影響が強く出ていることを示している。このことは、他の地域では余り変化していないー融解していないことを示している。

#### 4. 地表水・地下水量の変化の影響

地表水・地下水量の変化の影響をChurch et al. (2011a) はかなりのスペースを割いて論じている。Konikow (2011) に基づき、1993-2008間の平均で地下水の揚水過剰により海面水位が0.35mm/yr上昇するとしている。ただし、地下水涵養、ダム貯留など-0.44mm/yrの影響があり、トータルで-0.08mm/yrとなるとしている。一方、Wada et al. (2012) によると、2000年頃に両者は拮抗しているとしている。それ以後、地下水揚水分の影響が勝り、海面水位の上昇に寄与し、その影響は拡大して行くと予測する。

Church et al. (2011a) とWada et al. (2012) では符号も異なっていることから分かるように、この推定或いは予測には、使用する統計の精度が問題となる。この地下水量の変化が海面水位の変動に及ぼす影響は、人為的な温室効果ガスの大気中への排出による地球温暖化という論とは異なる、人類の影響が問題となる可能性のある事例と考えることができる。今後注視すべき事項であると云える。

#### 5. GMSLの将来予測

IPCC-WG1-AR4は21世紀末に、20世紀末に比較して18~59cm海面水位が上昇するとした。これは、仮定した温室効果ガスの大気中への排出量に基づくシミュレーションの結果であった。

GMSLの将来を予測する方法には、①外挿、②シミュレーションによる予測、③半経験的モデルなどがある。

③が必要になった理由として20世紀に観測されたGMSLの変動をモデル (上記②) が再現できなかったことが挙げられている (Church et al., 2011b)。これまでにみてきたように、大気中CO<sub>2</sub>濃度の増加にもかかわらず、GMSLの上昇率が大きく振動していること (図1、3参照)、上昇率が減速していることが分かった。また、上昇率の振動には太陽黒点数 (太陽活動) が密接な関連を持つことも分かった。さらに、Hansen et al. (2005) の方式では2003年以降の海洋の0-700m層における熱保有量の停滞を説明できないことを指摘できる (II.2参照)。以上のようなことから、CO<sub>2</sub>などの温室効果ガスの大気中濃度を主要因とするシミュレーションを将来のGMSLを予測する根拠とすることはできないことが分かる。

③の方法は次のようなものである。GMSLと関係する量 (例: 気温) とGMSLの関係を過去の両データから決め、その関係を使用して将来を予測するものである。関係する量として気温を利用する例で言えば、将来の気温が分からなければ将来のGMSLを予測できない。Grinsted et al. (2010) の場合には、将来の気温をシミュレーションによって予測されたIPCCの予測数値を使用する手法を採用している。Church et al. (2011b) が指摘するように、現在の方式のシミュレーションを使用する手法が問題となったために、半経験的手法が採用されたのであった。しかし、再びそのシミュレーションの結果を使用することになっている。

①の外挿法は20世紀或いは現在とほぼ同様



な条件が続くという前提で成立することである。しかし、前世紀と同じように気象・気候が推移するとは考えにくい。

以上から、現在は、21世紀末におけるGMSLを精度よく予測する方法は存在しないということになる。

### Ⅲ. 小島嶼国における海面水位の上昇問題 —ツバルを例に海岸侵食などの状況と原因 の検討—

地球温暖化による海面水位の上昇で、具体的な被害が生じているとされるのがツバルなどの小島嶼国での海岸侵食、浸水などである。

ここでは、ツバルを例に海面水位の状況、海岸侵食、浸水の状況とその原因について検討することにする。

#### 1. ツバルにおける海面水位の変動状況

ツバルにおける海面水位の観測がハワイ大学およびオーストラリア国立潮位センター（NTC）によって行われている。両者ともツバルの首都があるフナフティ（Funafuti）環礁のフォンガファレ（Fongafale）島に潮位計を設置し、観測を行っている。ハワイ大学によるものは、1977

年に設置され、1999年までのデータがある。NTCによるものは、1993年以来現在も観測を継続している。現在はテレメトリ化してNTCにデータを送るようになっている。また、GPSによる観測も行われている<sup>27)</sup>。

フナフティにおける海面水位の変動は図10のようになっている。回帰直線を求めると、 $y$ ：海面水位（mm）、 $x$ ：時間（年）として、 $y = 3.49x - 12.9$ となる。しかし、1997.8－1998.9および2010.1－2010.2の期間はENSOの影響を受けて大きく海面水位が低下している。そこで、この期間を除き回帰直線を求めると、 $y = 1.41x + 4165$ となる。期間が18年余と短いために長期のトレンドを見積もることは難しくなっている。なお、GPSの測定結果が $+0.2\text{mm/yr}$ （Geoscience Australia, 2008）<sup>28)</sup>と報告されているが、ULR4（補注6）では $-0.93\text{mm/yr}$ となっている。ULR4で南太平洋の環礁洲島（atoll island）の上下変動値を調べてみると、14の島についての平均で $-1.0\text{mm/yr}$ 、標準偏差 $\pm 1.1\text{mm/yr}$ となる。つまり、南太平洋の環礁洲島は平均的には沈下している。これはダーウインの環礁生成論と整合的である。フォンガファレ島での海面水位の変動は、以上からULR4の

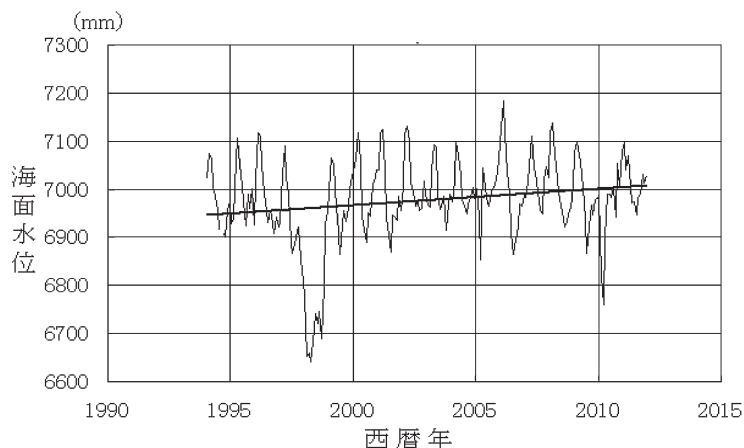


図10 フナフティにおける海面水位の変動（PSMSLデータ使用）

$y$ ：海面水位（mm）、 $x$ ：時間（西暦年）として、回帰直線は $y = 3.49x - 12.9$ となる。しかし、ENSOの影響により低下した期間（1997.8－1998.9及び2010.1－2010.2）を除くと回帰直線は $y = 1.41x + 4165$ となる。

結果を使用すると $1.4\text{mm/yr} - 0.9\text{mm/yr} = 0.5\text{mm/yr}$ となる。海面水位の観測期間が短いことから確定的なことをいうことはできないが、現状ではツバルでは海面水位の上昇はほとんど起きていないといえることができる。Hunter (2002)<sup>29)</sup>の解析では、陸地に相対的に $0.8 \sim 1.2\text{mm/yr}$ となっている。土地の沈降を補正すると $-0.1 \sim 0.3\text{mm/yr}$ となり、ここで得た結果とほぼ同じ結果となる。

現在のところ10年で5mmの上昇であるので、この程度の海面水位の上昇では現在進行中の海岸侵食などに海面水位の変動が絡んでいることはないと考えることができる。

## 2. ツバルの自然および社会的な環境

災害の現況を知り、その原因を探るためには、自然的状況、社会的な状況を把握する必要

がある。ここでは、Yamano et al. (2007) などに基いて整理することにする。フナフティ環礁は図11のようになっている。ここでは、ツバルの首都があるフォンガファレ島を対象とする。

フォンガファレ島の概略地形断面は、図12のようになっている。両側に高まりーラグーン側に低い浜提 (beach ridge)、大洋側に高いストームリッジ (storm ridge) ーがあり、中央部に低地が存在する。その中央部の低地には元は沼沢地であった箇所もある。土地利用・土地被覆および土地改変の変遷は図13:aのようになっている。図13:aによると、1941年以前は人家は浜提上に見られるだけであった。1943年になると、米軍が軍事基地を作り、滑走路 (地図上で島の中央部の直線的な白部で表示されている) が作られた。その当時のフナフティの人口は約500人前後と推定される<sup>30)</sup>。人口は1970年代後

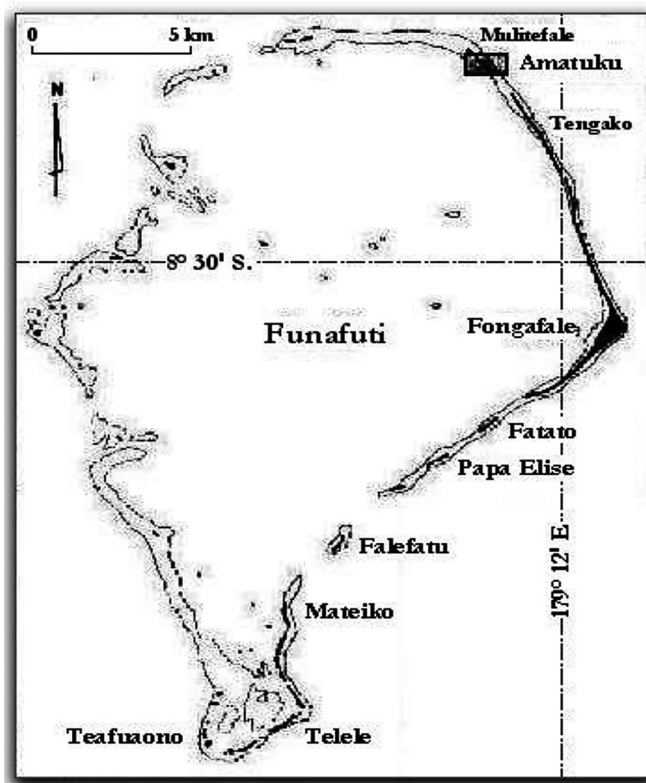


図11 フナフティ環礁の概観図 [Xue(2005)による]

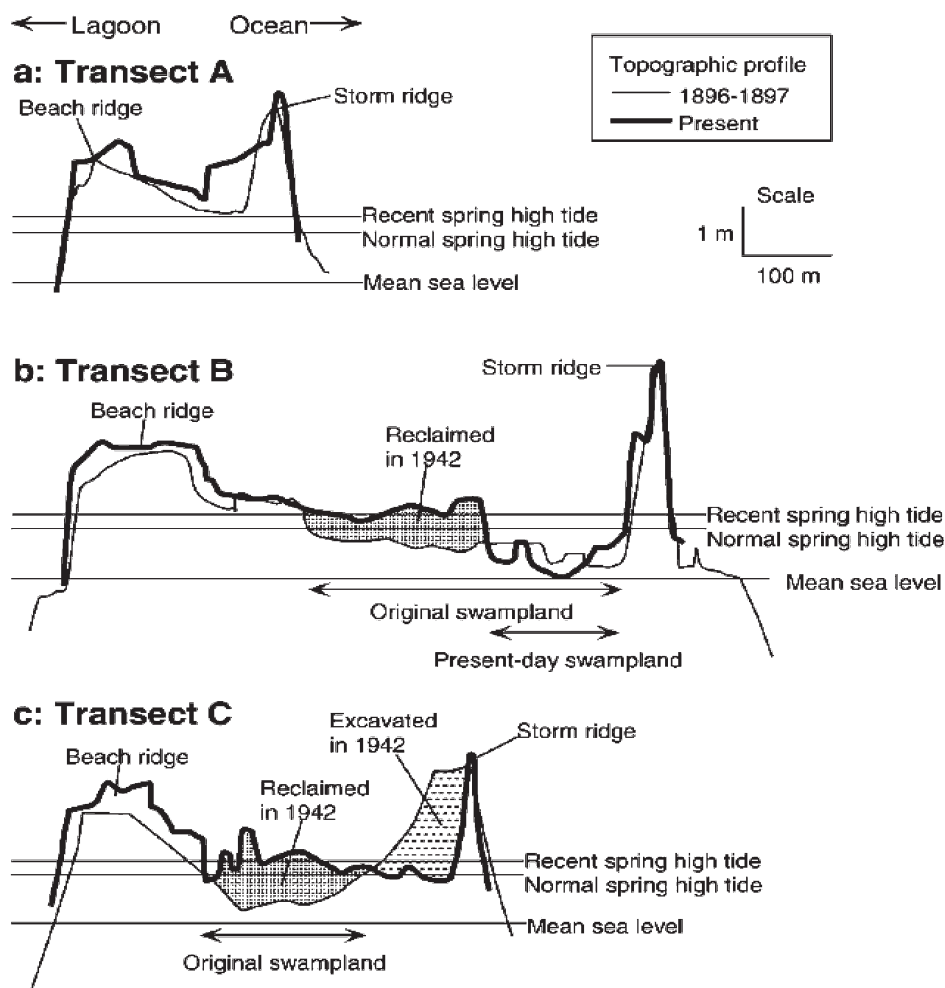


図12 フォンガファレ島の地形断面 [Yamano et al. (2007) による]  
(断面A, B, C の位置は図13に記載。)

半までに約1,000人程度にゆっくりと増加した。1980年前後には人口が約2,000人前後になり、人家は浜提を埋め尽くし、旧沼沢地を含む中央部低地の埋立地に進出している。さらに、人口が増加し、2000年頃には約4,000人を超えるまでになっている。そのために、中央低地の埋め立て地の土地利用・土地被覆は、滑走路の北西側では人家と掘削或いは埋め残された低地になっている。埋め残された低地はタロイモ畑、マングローブなどとなっている。また、浸水域或いは潜在的に浸水する地域(図13:b)

は、中央低地の埋立て地、埋め残された低地、或いは、ストームリッジの掘削地などになっていることが分かる。

### 3. ツバルにおける災害状況と考えられるその原因

以上、フナフティ環礁フォンガファレ島の地形改変、社会的変化を見てきた。フォンガファレ島では、大潮期に浸水が見られ、また海岸侵食が起きているという<sup>31)</sup>。さらに、天水と地下水に頼る島で渇水が大きな問題にもなった<sup>32)</sup>。

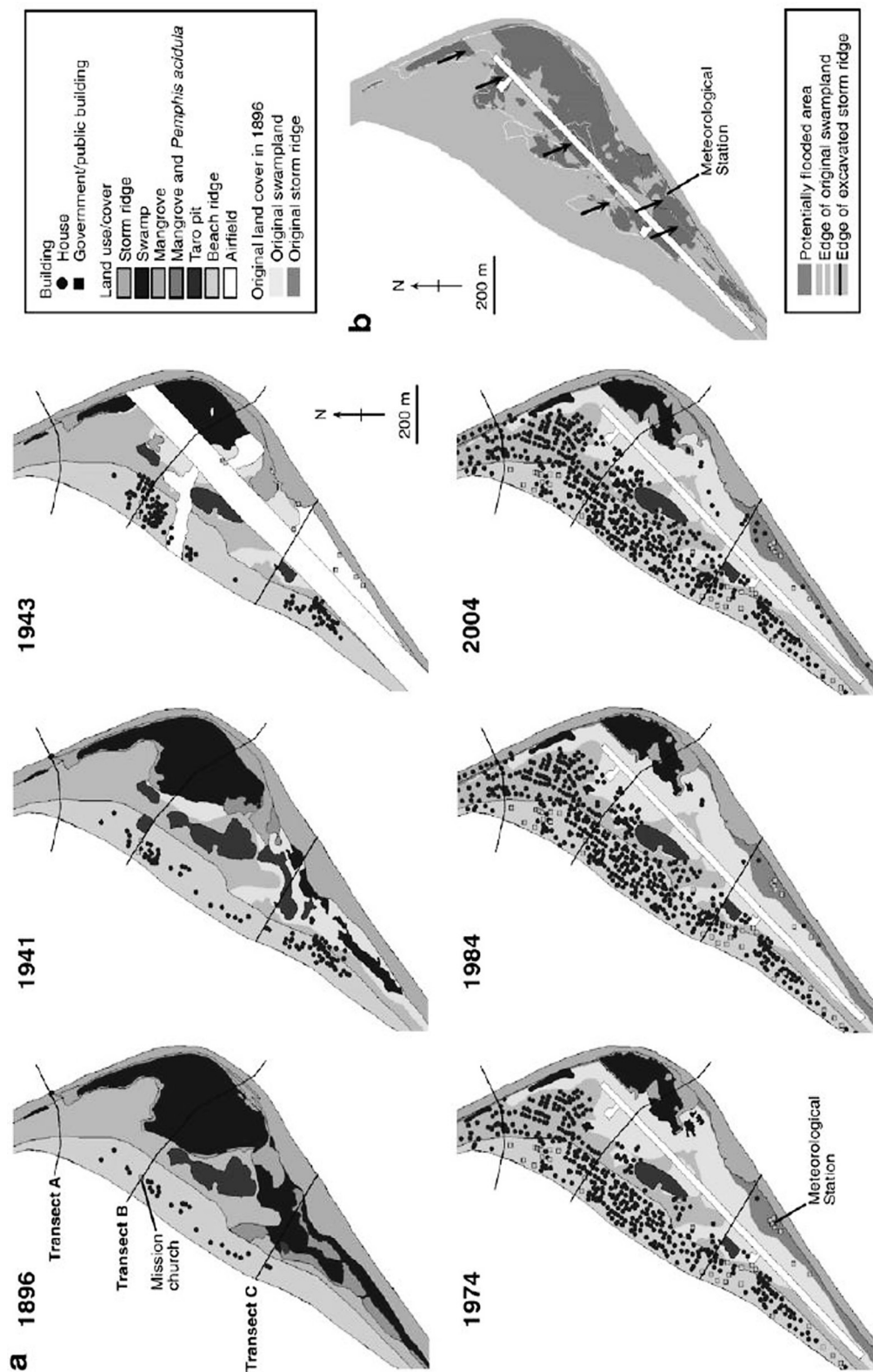


図13 フォンガファレ島の土地利用・土地被覆の変遷 [Yamano et al. (2007) による]

(パネルaの断面 A, B, C は図12の断面図の位置を示す。)

a) 中央太平洋の環礁洲島における最近の変化  
ツバルの海岸侵食を検討する前に、中央太平洋の環礁洲島がどのように変化しているのかを最初に見ておく。

中央太平洋のサンゴ礁からなる島々がどのように変化してきたかを19年～61年間隔の新旧空中写真・衛星画像を比較して調べた結果によると (Webb & Kench, 2010)、調査した27の環礁洲島のうち、面積で3%以上増加した島が12 (43%)、3%未満の増減の島が11 (43%) となり、3%以上の正味の侵食 (減少) を示す島は4 (14%) となった。なお、安定とした (面積変化が±3%以内の) 島でもその形態が変化した島がある。即ち、ある島で場所を変えて侵食と堆積が同時に起こった場合である。このことは単純に侵食、堆積が起こっている訳ではないことを示す。また、かれらの解析によれば、このような島の変化にはサイクロンなどの影響が大であるという。彼らの調査結果は、現状では太平洋の環礁洲島が全体として侵食にさらされているのではないことを示している。

フォンガファレ島のラグーン側で英国探検隊が行ったボーリングでは300m深でも基盤に達しなかった (Amstrong et al., 1904)。構成は、珊瑚 (coral reefs) あるいはそのブロックと砂が交互になったものであった。環礁洲島は海上に少し顔を出した部分であって、その下には環礁洲島を繋いで恰も環をなすかのように珊瑚やそれが破碎されて作られた砂が厚く堆積している。そして、環礁として非常に長い期間存在してきた。先のWebb & Kench (2010) の調査結果からも窺えるように、島は水理・海象・気象条件に合わせダイナミックに変形しているといえる。

#### b) アマトック島の海岸侵食、浸水

ツバルにおける侵食、海岸侵食の例としてアマトック島 (Amatuku Island) を Eschenbach (2004) および Xue (1996, 2005) に従って検討する。神保 (2004) によると、春の大潮のとき

にアマトック島の海員養成学校の来賓教官用宿泊施設では地下から湧き出した水で1m30cmほども浸水した。

首都があるフォンガファレ島とアマトック島の間にはテンガコ (Tengako) 島がある (図11)。フォンガファレ島とテンガコ島は盛土道路 (causeway) で結ばれている。図11で細 (破) 線で描かれている箇所はリーフフラット (reef flat) である。島は黒く描かれている。この図から、島はリーフフラットの一部分が海上に出たものといえるような形状であることが分かる。アマトック島は、第二次大戦で米軍基地として使用されて以後大きく変化した。1943年にラグーンからリーフフラットを削って島にまで至る広いチャンネルが掘削された (図14)。さらに、アマトック島とその北西にあるムリテファレ (Mulitefale) 島とは盛土道路で結ばれた。その盛土材は盛土道路の脇で採取された。その結果、144m×15mのピットが形成された。なお、その盛土道路は現在は侵食でなくなっている。アマトック島の北西部の先端は1944年～1979年までは相対的に安定していた。しかし、1979年以降激しい侵食に見舞われた。その原因としては、残存していた盛土道路が破損し、その箇所で太平洋とラグーンが繋がったことによると考えられている (Xue, 1996)。また、1979年に建設された海員養成学校の建物のコンクリート用、整地用にも珊瑚、砂が使用され、地形を改変した。しかし、その影響は米軍工事に比べれば小さい (Xue, 1996)。以来1996年までに北部の先端が46mも後退した。1996年までに太平洋側で約2.2～4m、ラグーン側で約6mも海岸線が後退した (Xue, 1996)。図14の漂砂の向き (図中の矢印) から分かるように、アマトック島の侵食が激しいのは、ラグーン側のチャンネルの掘削および大洋側でのピットの掘削にあると結論されている (Xue, 1996)。これらの工事はアマトック島の置かれた条件を変えてしまった。その変わった条件に適合するように島は変



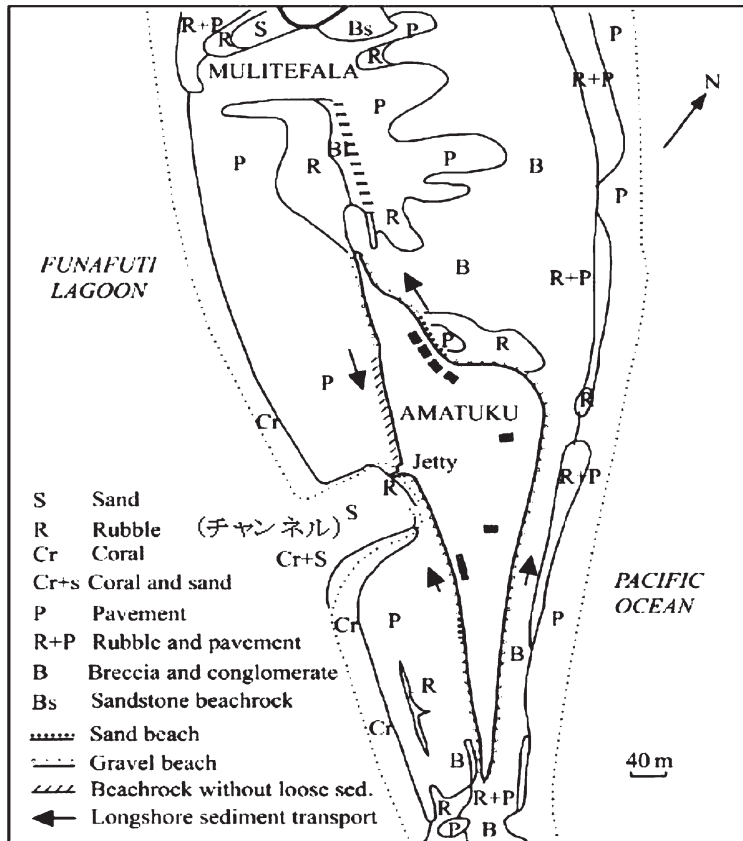


図14 アマトック島の海岸地質図 [Xue (2005) による]

(日本語は著者が追加)

化しているのである。

アマトック島は規模は小さいが、地形的にはフォンガファレ島と同様に両側が高く、中央部が低い。神保 (2004) の海員養成学校における浸水状況に関する記述からみて、来賓教官用の宿泊施設は中央部の低い土地に建てられていると考えられる。その低地はかなり低いと推定される。図12からは、現在の春期高潮位 (recent spring high tide) が通常の高潮位 (normal spring high tide) より約30~40cmほど高いことが分かる。また、潮位予測図<sup>33)</sup> (図15) によれば2006年に表示期間では最高潮位になる。この図は、吉岡 (2010) が調べた年間の高潮位が3.1mを越えた日数の傾向と一致する。以上の

説明から分かるように、この高潮位にはいわゆる地球温暖化が関わっているとは考えられない。

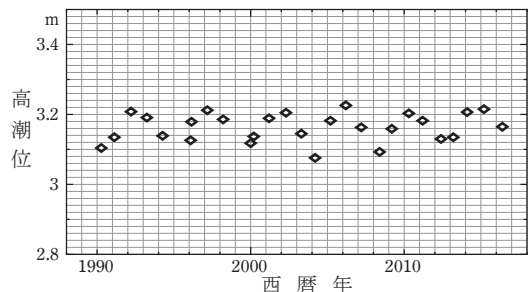


図15 フナフティにおける各年最高潮位の予測値

[Pacific Country Report(2010)による]

### c) フォンガファレ島における浸水および地下水塩水化

フォンガファレ島では、大潮時などに浸水することが報じられている<sup>34)</sup>。浸水箇所は図13:bの矢印がある付近である。浸水箇所の1例である「集会所」[地球異変余録ツバル編(補注34)に写真がある]はパネルbの右から2番目の矢印あたりであり、図12の断面Bの近くである。埋め立てられた土地でも現在の高潮位面より低いところが見られる。また、現在の沼沢地、タロイモ畑では通常の春の高潮位よりも低いところが見られる。したがって、春の大潮時には地下から水が出てきても不思議ではない。図12をみると、昔から大潮時などでは浸水していた場所があったと推定できる。幸いなことには当時は地下水レンズのお蔭で淡水の浸水であったと考えられる。また、土地利用も浸水に敏感ではなかった。現在は、浸水に敏感な土地利用に変化した上に、淡水の浸水ではなく、塩水(海水)の浸水であることが困難度をさらに酷くしている。なぜ、淡水ではないのであろうか。

自然状態の環礁洲島では、降雨の一部は海へ流出し、一部は植物が蒸発散する。また、一部は地下水を涵養する。地下水は島の下部にレンズ状に海水の上に帯水する(地下水レンズ)。この地下水は、飲料水として、また雑用水、農業用水などとして利用される。涵養量が少なくなると、地下水レンズに海水が混入する(地下水塩水化)。フォンガファレ島では人口の増加により、人家が増え、また、道路が作られた。これらのことは、地表の流出率を高め、同時に地下水の利用の拡大を招く。その結果は地下水の涵養量の減少、地下水利用の増大、地下水量の減少となる。その過程が進行すると、淡水地下水レンズを保持できなくなる。かつては、人家は浜提の上で(サイクロンなどでもなければ)浸水することはなかった(図13参照)。また、地下水レンズのお蔭でタロイモ畑の浸水はあったとしても淡水であった。しかし、現在は

浸水箇所までに人家が建った。また、浸水は淡水ではなく塩水(交じり)となった。フォンガファレ島の「都市化」が天水の利用・地下水利用の増大を招き、地下水量の減少に拍車をかけ、地下水の塩水化を加速した(Eschenbach, 2004)。さらに、サイクロンなどで高潮になると、雨水が行き場をなくし、より洪水を激しくする(Eschenbach, 2004)。以上から、ここでも現象を引き起こす原因は、大気中の温室効果ガス濃度の増大による、いわゆる「地球温暖化」ではないことが明らかである。大洋に浮かぶ小さな島に「都市化」問題が生じている<sup>35)</sup>。生起している問題—この場合には海岸侵食或いは地下水塩水化、浸水—to正しく対処するには、正しく問題を認識することが不可欠の前提となる。

### おわりに

IPCCは、大気中へのCO<sub>2</sub>を中心とする温室効果ガスの人為的な排出によって、今世紀末にはGMSLが20世紀末に対して18~59cm上昇すると予測している[IPCC-WG1-AR4]。それを防ぐために、CO<sub>2</sub>排出の削減を求めている。また、小島嶼国はそれを要求している。

本小論の調査・検討では、以下のことが明らかになった。

- ①20世紀のGMSLの上昇率は1.7~1.8mm/yrとされている。しかし、GPSの測定による土地の上下動を補正すると、1.5mm/yr前後となった。
- ②海面水位の上昇率を求める際に、現在事実上標準的になされるGIA補正には問題がある。
- ③海面水位の上昇率の推移は大きく振動している。20世紀後半からGMSLの上昇は加速ではなく減速している。
- ④0~700m層の海洋の熱保有量は2003年頃から横ばいになっている。また、地表気温偏差もほぼ同時期から横ばいになっている。

⑤グリーンランドの気温および再現された氷河の融解範囲指数の推移では、地表気温偏差の全球（或いは北半球）平均とは異なり、1940年代にピークとなっている。

⑥南極の気温の推移は1970年頃から停滞している。その例外である南極半島も2000年頃より低下している。以上の影響が現れ、融解指数が2005年頃から降下している。

以上のことは、温室効果ガスの大気中濃度の増大による昇温、海面水位の上昇という地球温暖化論が成立していないことを示す。その結果、現状では将来の海面水位を精度よく予測する方法を持たない。現在得られている値を直線的に外挿すると、今世紀末には15cm程度上昇という結果になる。しかし、上昇率は現在減少している。その帰趨は現状では不明である。

ツバルにおける海面水位の上昇は極々僅かである。ツバルにおいて起こっている浸水・侵食の原因は海面水位の上昇ではない。その原因はツバルにおける「都市化」と過去の基地建設などの土木・建築工事が重要な要因となっている。

メディアはセンセーショナルではなく、事実を掘り下げて報じることが求められている。

#### 謝辞

本小論を作成するに当たり、文献の検索では“CO<sub>2</sub> Science (<http://www.co2science.org/>)”が役に立った。また、編集委員会からはいろいろな援助を受けた。記して感謝する。

#### 補注

(URLが表示され、右肩に\*\*が表示されている場合には2012年10月1日に確認したことを示す。)

- 1) “CO<sub>2</sub> Science”が実施している中世温暖期プロジェクト (Medieval Warm Period Project) の結果によると、中世温暖期は108事例の平均で現在より約0.8℃高かった。なお、この値はウェブページ（下記URL）に表示されている棒グラフより計算した。

<http://www.co2science.org/data/mwp/quantitative.php>\*\*

また、Loehle & McCulloch (2008) の結果と hadcrut 3 とを結合した地表気温偏差の推移では、小氷期には約1℃ほど現在より低かった。

Loehle & McCullochのデータ：<http://www.ncasi.org/Publications/Detail.aspx?id=3025>\*\*

hadcrut 3：<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/hadcrut3-gl.dat>\*\*

- 2) 下記URL参照。

<http://wattsupwiththat.com/2009/04/07/archibald-on-sea-level-rise-and-solar-cycles/> \*\*

太陽黒点数：<http://sidc.oma.be/sunspot-data/>\*\*

- 3) Holgate (2007) は大気圧と GIA に対する補正を行っているが、それらの補正は行っていない。
- 4) GIA または後氷河期リバウンドとは以下のようなものである。氷床の重みで、地殻・マントルが沈み込んだり、或いは周りに流出した。氷床の水が融解し、氷床が消失すると、沈み込んでいた部分に周りから物質が流入し、上昇を開始する（リバウンド）。地殻・マントルを構成する物質は、地震動のように早い動きには通常の弾性体のように挙動するが、長時間かけてゆっくりと作用する力には粘性体のように挙動する。このような物質を粘弾性体という。地球のマントル、地殻を構成する物質は粘弾性体であることになる。

- 5) <http://sealevel.colorado.edu/faq#n3113>\*\*

GIAは海底下にも起こっている。そのため、海洋の容積が変化する。したがって、符号を変えた量が上昇率に加わる。

- 6) Wöppelmann et al. (2009) Table1において、ULR1～ULR3までの解析に使用している28点のうち1点をULR4で確認できなかった。そのため、27点の結果である。計算に当っては各点の検潮データの上昇率はWöppelmann et al. (2009) Table1の値をそのまま使用した。なお、ULR1～ULR3までのGMSLの上昇率はWöppelmann et al. (2009) Table1から計算した。

ULR4：[http://www.sonei.org/IMG/txt/ULR4\\_Vertical-Velocities\\_Table.txt](http://www.sonei.org/IMG/txt/ULR4_Vertical-Velocities_Table.txt)\*\*

- 7) GRACE：Gravity Recovery and Climate Experiment の略。NASAとドイツのGFZ(GeoForschungs Zentrum)

との共同による本格的な重力場測定ミッションであり、2001年秋に打ち上げられた。同一軌道に2つの衛星を数100kmの間隔で打ち上げ、互いの距離の時間変化 (range rate)、すなわち速度の測定を行う。速度変化として重力場の変化を測定することができる。

<http://www.csr.utexas.edu/grace/>\*\*

- 8) TOPEX/ポセイドン (TOPEX/Poseidon) とは、海面の高度 (海面高度) を計測するアメリカ航空宇宙局 (NASA) とフランス国立宇宙センター (CNES) による海洋観測マッピングミッションである。この名はTOPography EXperimentの頭文字とギリシア神話の海の神ポセイドンにちなんだものである (ウィキペディアによる)。周回周期は10日である。そのために、波浪などのように、検潮儀の記録では日平均あるいは月平均を取ることににより影響を除去できると考えられる海面水位の変動要因についても、正しく補正しなければならないという課題を背負うことになる。

- 9) 下記URLで個々の検潮所の記録とSRAの値の差、変化率の差をみることができる。このシステムは検潮記録をチェックするために作成したと述べられている。

検潮所の記録とSRAの値の差の標準偏差を計算すると、TOPEX/ポセイドンの場合で $\pm 2.4\text{cm}$ となる。ジェーソン1 (Jason1)、ジェーソン2でもほぼ同じ値となる。変化率の両者の差の絶対値平均は本文で述べた値から予想される値より大きく、TOPEX/ポセイドン、ジェーソン1の場合でそれぞれ $4.6\text{mm/yr}$ 、 $4.1\text{mm/yr}$ となる。

<http://www.aviso.oceanobs.com/en/calval/in-situ-calibration-and-validation/in-situ-global-statistics.html> \*\*

- 10) 検潮記録はPermanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) データを利用し、GPSデータはULR4を使用した。

PSMSL : <http://www.psmsl.org/data/obtaining/>\*\*

ULR4 : 補注 6。

- 11) Jevrejeva et al. (2008) のデータは下記URLからダウンロードできる。

<http://www.psmsl.org/products/reconstructions/gslGRL2008.txt>\*\*

- 12) EMD法は、対象となる関数・変量を準周期性がある

固有モード関数 (intrinsic mode function-IMF) に分解する方法である。EMD法を適用すると、準周期が短いIMFから順に抽出される。IMFが抽出された残りは周期性を示さない量が残る。これを残余 (remainder-rm) ということにする。対象とする変量が時間的に推移する量であれば、このrmはその変量のトレンドを示すことになる。Jevrejeva et al. (2008) のデータは9つのIMFとrmに分解された。長いほうから、準周期が約150年、約90年、約60年、約50年、約25年、約15年、11.5年などのIMFが抽出されている。

- 13) SRA データには幾つかのバージョンがあるが、ここではコロラド大によるversion\_2012\_rel4を使用した。このデータは下記URLからダウンロードできる。

[http://sealevel.colorado.edu/files/2012\\_rel4/sl\\_ns\\_global.txt](http://sealevel.colorado.edu/files/2012_rel4/sl_ns_global.txt)\*\*

- 14) 気象庁データは下記URLから入手した。

[http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/temp/list/mon\\_wld.html](http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/temp/list/mon_wld.html)\*\*

- 15) アルゴ計画とは、全世界中層フロート観測網 (A Global Array for Temperature/Salinity Profiling Floats) によって海水温、塩分濃度の断面記録を取得する計画である (ウィキペディアによる)。

<http://wo.jcommops.org/cgi-bin/WebObjects/Argo>\*\*

[http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo\\_web/argo/index.html](http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo_web/argo/index.html)\*\*

- 16) 下記URLからデータをダウンロードし、変化率を求めた。

700m熱膨張 (thermosteric) データ

[http://data.nodc.noaa.gov/woa/DATA\\_ANALYSIS/3M\\_HEAT\\_CONTENT/DATA/basin/yearly\\_sl/a-mm-w0-700m.dat](http://data.nodc.noaa.gov/woa/DATA_ANALYSIS/3M_HEAT_CONTENT/DATA/basin/yearly_sl/a-mm-w0-700m.dat)\*\*

2000m熱膨張データ (5年移動平均データ)

[http://data.nodc.noaa.gov/woa/DATA\\_ANALYSIS/3M\\_HEAT\\_CONTENT/DATA/basin/pentad\\_sl/pent-a-mm-w0-2000m.dat](http://data.nodc.noaa.gov/woa/DATA_ANALYSIS/3M_HEAT_CONTENT/DATA/basin/pentad_sl/pent-a-mm-w0-2000m.dat) \*\*

- 17) Levitus et al. (2012) による0-700mと気象庁による年平均気温偏差の1955~2010年間について相関をとった結果である。また、Church & White (2006) による海面水位と気象庁が取りまとめた地表気温偏差全球平均値の1871~2001年間について相関を

- とった結果は0.85となる。
- 18) “Open Letter to the Secretary-General of the United Nations”  
[http://www.atmos.washington.edu/2009Q1/111/Readings/Contrarian\\_petition\\_to\\_Bali\\_short.pdf](http://www.atmos.washington.edu/2009Q1/111/Readings/Contrarian_petition_to_Bali_short.pdf)
  - 19) Hansen et al. (2005) Fig.2をデジタイズして得た数値データを直線回帰し、勾配を求めた。なお、Hansen et al.の熱保有量に関するシミュレーションの結果 (Fig.2) は小さな変動を示すもののほとんど直線的な増加を示している。
  - 20) B. Tisdaleによる。ただし、月データと年データの相違から僅かにTisdaleの値とは異なる。  
 URL :  
[http://bobtisdale.wordpress.com/2009/10/23/why-are-ohc-observations-0-700m-diverging-from-giss-projections/\\*\\*](http://bobtisdale.wordpress.com/2009/10/23/why-are-ohc-observations-0-700m-diverging-from-giss-projections/**)
  - 21) Church et al. (2011a): 0.12mm/yr, Wu et al. (2010): 0.27mm/yr, Zwally et al. (2011): 0.47mm/yr, Jacob et al. (2012) : 0.61mm/yr, Rignot et al. (2011): 1.3mm / yrなどである。
  - 22) 当該日本人は約30年前に移住したという。1970年代～80年代に移住したことになる。その時期はFrauenfeld et al. (2011) の氷融解範囲指数 (補注23参照) がマイナスの時期になっている (図8:A)。また、1990年代も氷融解範囲指数がマイナスの時期になっている。そのために、それらの時期は、海氷も現在よりも多かった時期に一致している。
  - 23) 氷融解範囲指数 (ice melt extent index) は融解範囲データを平均値を0、標準偏差を1とするように「正規化」した指数となっている。幾つかあるデータ系列を正規化することで統合することのできるようにした (Frauenfeld et al.,2011)。
  - 24) Leclercq et al. (2012) は、氷河の後退は20世紀前半が後半に比較して大きかったと結論している。同時に、そのことをもって、質量収支も前半が後半に比較してマイナスが大きかったとは必ずしも意味しないと述べている。
  - 25) この回帰直線はC.Idsoによるものである。Chapman & Walsh (2007) のオリジナルとは異なる。1970年以前の上昇とそれ以後の停滞との区別を強調した回帰である。  
[http://www.co2science.org/articles/V10/N51/C1.php\\*\\*](http://www.co2science.org/articles/V10/N51/C1.php**)
  - 26) McGrath & Steffen (2012) が記載する7観測所の平均値。
  - 27) 南太平洋潮位・気候監視プロジェクト (South Pacific Sea Level and Climate Monitoring Project—SPSLCMP) の一環として実施されている。潮位記録 (検潮記録) は毎年 “Pacific Country Report on Sea Level and Climate: Their Present State” として公表されている。下記URLからツバルを含む14カ国について2007–2010年分がダウンロードできる。  
[http://www.bom.gov.au/oceanography/projects/spslcmp/country\\_report.shtml\\*\\*](http://www.bom.gov.au/oceanography/projects/spslcmp/country_report.shtml**)  
 また、ツバルの検潮記録は下記URLからダウンロードできる。期間は1993年3月～である。  
[http://www.bom.gov.au/ntc/IDO70056/IDO70056SLD.txt\\*\\*](http://www.bom.gov.au/ntc/IDO70056/IDO70056SLD.txt**)  
[http://www.psmsl.org/data/obtaining/\\*\\*](http://www.psmsl.org/data/obtaining/**)  
 南太平洋潮位・気候監視プロジェクトについては下記URL参照。  
[http://www.bom.gov.au/pacificsealevel/index.shtml\\*\\*](http://www.bom.gov.au/pacificsealevel/index.shtml**)  
 GPSに関しては、設置が現在進行中である。ツバルには2001年12月に設置されている。報告書—South Pacific Sea Level and Climate Monitoring GPS Coordinate Time Series —が下記URLから入手できる。  
[http://www.ga.gov.au/image\\_cache/GA14840.pdf\\*\\*](http://www.ga.gov.au/image_cache/GA14840.pdf**)  
 また、GPSの測定結果 (ULR-4) は補注6参照。
  - 28) Geoscience Australia 補注27参照。
  - 29) [http://staff.acecrc.org.au/~johunter/tuvalu.pdf\\*\\*](http://staff.acecrc.org.au/~johunter/tuvalu.pdf**)
  - 30) Yamano et al. (2007) -Fig. 4から推定した。以下人口の記載は同様な方法によって得たものである。
  - 31) 例えば、神保 (2004)。
  - 32) 2011年にツバル—フナフティが渇水となり、ニュージーランド政府が真水と淡水化装置を空輸した (ニュージーランドヘラルド 2011年10月4日)。また、日本政府も移動式淡水化装置を援助し、ニュージーランド政府に依頼して空輸してもらったことを公表した (外務省プレスリリース, 2011年11月4日)。
  - 33) Pacific Country Report Sea Level & Climate: *Their Present State Tuvalu*, December, 2010.  
[http://www.bom.gov.au/ntc/IDO60033/IDO60033.2010.pdf\\*\\*](http://www.bom.gov.au/ntc/IDO60033/IDO60033.2010.pdf**)



34) 例えば、地球異変余録ツバル編。

[http://doraku.asahi.com/lifestyle/earthphoto/070918\\_photo19.html#photogallery\\*\\*](http://doraku.asahi.com/lifestyle/earthphoto/070918_photo19.html#photogallery**)

35) 地球異変余録ツバル編（補注34）で記者は、「人口が急増した首都フナフティでは、こうした低地にも住宅ができ、床上浸水の被害も出るようになってきました。」と記している。しかし、紙面にはそのような社会的な状況は述べられていない。

## 文献

- Alley, R.B. and S. Anandakrishnan (1995), Variations in melt-layer frequency in the GISP2 ice core: implications for Holocene summer temperatures in central Greenland. *Annals of Glaciology*, **21**:64-70.
- Armstrong, H.E., A.M. Field and W.W. Watts (1904), *The atoll of Funafuti: borings into a coral reef and the results: being the report of the Coral Reef Committee of the Royal Society*. Royal Society of London.
- Antonov, J.I., S. Levitus and T.P. Boyer (2005), Thermosteric sea level rise, 1955-2003. *Geophysical Research Letters*, **32**:L12602.
- Beckley ,B.D., F.G. Lemoine, S.B. Luthcke, R.D. Ray and N.P. Zelensky (2007), A reassessment of global and regional mean sea level trends from TOPEX and Jason-1 altimetry based on revised reference frame and orbits. *Geophysical Research Letters*, **34**: L14608.
- Bouin, M.N. and G. Wöppelmann (2010), Land motion estimates from GPS at tide gauges: a geophysical evaluation. *Geophysical Journal International*, **180**:193-209.
- Box, J.E., L. Yang, D.H. Bromwich and L.-S. Bai (2009), Greenland ice sheet surface temperature variability: 1840-2007. *Journal of Climate*, **22**:4029-4049.
- Cabanes, C., A. Cazenave, and C.L. Provost (2001), Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations. *Science*, **294**:840-842.
- Cazenave, A. and W. Llovel (2010), Contemporary sea level rise. *The Annual Review of Marine Science*, **2**:145-173.
- Cazenave, A. and R.S. Nerem (2004), Present-day sea level change: observations and causes. *Review of Geophysics*, **42**:RG3001.
- Chapman, W.L. and J.E. Walsh (2007), A synthesis of Antarctic temperatures. *Journal of Climate*, **20**:4096-4117.
- Church, J.A. and N.J. White (2006), A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, **33**:L01602.
- Church, J.A. and N.J. White (2011), Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Survey in Geophysics*, **32**:585-602,
- Church, J.A., N.J. White, L.F. Konikow, C.M. Domingues, J.G. Cogley, E. Rignot, J.M. Gregory, M.R. van den Broeke, A.J. Monaghan and I. Velicogna (2011a), Revisiting the Earth's sea - level and energy budgets from 1961. *Geophysical Research Letters*, **38**:L18601.
- Church, J.A., J.M. Gregory, N.J. White, S.M. Platten and J.X. Mitrovica (2011b), Understanding and projecting sea level change. *Oceanography*, **24**:130-143.
- Douglas, B. (1991), Global sea level rise. *Journal of Geophysical Research*, **96**:6981-6992.
- Douglas, B. (2001), Sea level change in the era of the recording tide gauge. in Douglas, B., M. Kearney, and S. Leatherman, (eds.), *Sea level rise: history and consequences. International Geophysics Series*, vol.75. 37-64.
- Eschenbach, W. (2004), Tuvalu not experiencing increased sea level rise. *Energy and Environment*, **15**:527-543.
- Fairbridge, R.W. and O.A. Krebs (1962), Sea level and the southern oscillation. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **6**:532-545.
- Frauenfeld, O.W., P.C. Knappenberger and P.J. Michaels (2011), A reconstruction of annual Greenland ice melt extent, 1784-2009. *Journal of Geophysical Research*, **116**:D08104.
- Gornitz, V., S. Lebedeff, and J. Hansen (1982), Global sea level trend in the past century. *Science*, **215**:1611-1614.
- Grinsted, A., J.C. Moore and S. Jevrejeva (2010), Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100AD. *Climate Dynamics*, **34**:461-472.
- Gutenberg, B. (1941), Changes in sea level, postglacial

- uplift and mobility of the Earth's interior. *Bulletin of the Geological Society of American*, **52**:721-772.
- Hansen, J., L. Nazarenko, R. Ruedy, M. Sato, J. Willis, A.D. Genio, D. Koch, A.Lacis, K. Lo, S. Menon, T. Novakov, J. Perlwitz, G. Russell, G.A. Schmidt and N. Tausnev (2005), Earth's energy imbalance: confirmation and implications. *Science*, **308**:1431-1434.
- Holgate, S.J. (2007), On the decadal rates of sea level change during the twentieth century. *Geophysical Research Letters*, **34**:L01602.
- Holgate, S.J. and P.L. Woodworth (2004), Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s. *Geophysical Research Letters*, **31**:L07305.
- Houghton, J.T., J. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X.Dai, K.Maskell and C.A. Johnson (eds.) (2001), *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge University Press.
- Houston, J.R. and R.G. Dean (2011), Sea-level acceleration based on U.S. tide gauges and extensions of previous global-gauge analyses. *Journal of Coastal Research*, **27**:409-417.
- Houston, J.R. and R.G. Dean (2012), Comparisons at tide-gauge locations of glacial isostatic adjustment predictions with Global Positioning System measurements. *Journal of Coastal Research*, **28**:739-744.
- Huang, N.E., Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C.C. Tung and H.H. Liu (1998), The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceeding of the Royal Society of London A*, **454**:903-995.
- Jacob, T., J. Wahr, W.T. Pfeffer and S. Swenson (2012), Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, **482**:514-518.
- Jevrejeva, S., J.C. Moore, A. Grinsted and P.L. Woodworth (2008), Recent global sea level acceleration started over 200 years ago?. *Geophysical Research Letters*, **35**:L08715.
- 神保哲生 (2004), ツバル, 春秋社. 東京.
- Konikow, L.F. (2011), Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea - level rise. *Geophysical Research Letters*, **38**:L17401.
- Leclercq, P.W., A. Weidick, F. Paul, M. Bolch, M. Citterio and J.Oevlemans (2012), Historical glacier length changes in West Greenland. *The Cryosphere*, **6**:1339-1343.
- Levitus, S., J.I. Antonov, T.P. Boyer, O.K. Baranova, H.E. Garcia, R.A. Locarnini, A.V. Mishonov, J.R. Reagan, D. Seidov, E.S. Yarosh and M.M. Zweng (2012), World ocean heat content and thermosteric sea level change (0-2000m), 1955-2010. *Geophysical Research Letters*, **39**:L10603.
- Loehle, C. and J.H. McCulloch (2008), Correction to: a 2000-year global temperature reconstruction based on non-treering proxies. *Energy and Environment*, **19**:93-100.
- McGrath, D. and K. Steffen (2012), Recent cooler condition on the Northern Antarctic Peninsula. in Blunden, J. and D. S. Arndt (eds.), *State of the climate in 2011. Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society*, **93**:S154-S156.
- Monaghan, A.J. and D.H. Bromwich (2008), Advances in describing recent Antarctic climate variability. *Bulletin of American Meteorological Society*, **89**:1295-1306.
- Mörner, N.-A. (1973), Eustatic change during the last 300 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **13**:1-14.
- Nakiboglu, S.M. and K. Lambeck (1991), Secular sea level change. in R.Sabadini, K.Lambeck and E.Boshi (eds), *Glacial Isostasy, sea-level and mantle rheology*, 237-258.
- Nerem, R.S., D.P. Chambers, C. Choe and G.T. Mitchum (2012), Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions. *Marine Geodesy*, **33**:S1:435-446.
- O'Donnell, R., N.Lewis, S. McIntyre and J. Condon (2011), Improved methods for PCA-based reconstructions: case study using the Steig et al. (2009) Antarctic temperature reconstruction. *Journal of Climate*, **24**:2099-2115.
- Opel, T., D. Fritzsche, H. Meyer, R. Schütt, K. Weiler, U. Ruth, F. Wilhelms and H. Fisher (2009), 115 year ice-core data from Akademii Nauk ice cap, Severnaya

- Zemlya: high-resolution record of Eurasian Arctic climate change. *Journal of Glaciology*, **55**:1-11.
- Pfeffer, W.T. (2011), Land ice and sea level rise: a thirty-year perspective. *Oceanography*, **24**:94-111.
- Rignot, E., I.Velicogna, M.R. van den Broeke, A. Monaghan and J.T.M.Lenaerts (2011), Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophysical Research Letters*, **38**: L05503.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) (2007), *Climate change 2007: the physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Tedesco, M. and A.J. Monaghan (2009), An updated Antarctic melt record through 2009 and its linkages to high-latitude and tropical climate variability. *Geophysical Research Letters*, **36**:L18502.
- van der Veen, C.J. (2002), Polar ice sheets and global sea level: how well can we predict the future? *Global and Planetary Change* **32**:165-194.
- Wada, Y., L.P.H. van Beek, F.C.S. Weiland, B.F. Chao, Y.n-H.Wu and M.F.P. Bierkens (2012), Past and future contribution of global groundwater depletion. *Geophysical Research Letters*, **39**:L09402.
- Webb, A.P. and P.S. Kench (2010), The dynamic response of reef islands to sea-level rise: evidence from multi-decadal analysis of island change in the Central Pacific. *Global and Planetary Change*, **72**:234-246.
- Willis, J.K., D. Roemmich and B.Cornuelle (2004), Interannual variability in upper ocean heat content, temperature, and thermosteric expansion on global scales. *Journal of Geophysical Research*, **109**:C12036.
- Wöppelmann, G., B.M. Miguez, M.-N. Bouin and Z. Altamimi (2007), Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges worldwide. *Global and Planetary Change*, **57**:396-406.
- Wöppelmann, G., C.Letetrel, A. Santamaria, M.-N. Bouin, X. Collilieux, Z.Altamimi, S.D.P. Williams and B. M.Miguez (2009), Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame. *Geophysical Research Letters*, **36**:L12607.
- Wu, X., M.B. Heflin, H. Schotman, B.L.A. Vermeersen, D. Dong, R.S. Gross, E.R.Ivins, A.W. Moore and S.E. Owen (2010), Simultaneous estimation of global present-day water transport and glacial isostatic adjustment. *Nature Geoscience*, **3**:642-646.
- Xue, C. (1996), Costal erosion and mananagement of Amatuku Island, Funafuti Atoll, Tuvalu. *SOPAC Technical Report* 234.
- Xue, C. (2005), Causes of land loss in Tuvalu, a small island nation in the Pacific. *Journal of Ocean University of China (Ocean and Coastal Research)*, **4**:115-123.
- Yamano, H., H. Kayanne, T. Yamaguchi, Y. Kuwahara, H. Yokoki, H. Shimazaki and M. Chikamori (2007), Atoll island vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstruction: Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu. *Global and Planetary Change*, **57**:407-416.
- 吉岡正徳 (2010), ツバルにおける海面上昇問題. 国際文化学研究: 神戸大学大学院国際文化学研究紀要, **34**:47-70.
- Zwally, H. J., J. Li, A.C. Brenner, M. Beckley, H.G. Cornejo, J. Dimarzio, M.B. Giovinetto, T.A. Neumann, J. Robins, J.L. Saba, D.Yi and W. Wang (2011), Greenland ice sheet mass balance: distribution of increased mass loss with climate warming; 2003-07 versus 1992-2002. *Journal of Glaciology*, **57**:88-102.